施氮深度和水分胁迫对藜麦幼苗生理及产量的影响

李亚妮[1]，庞春花[1,2]，张永清[1,3]，张媛[1]

（1. 山西师范大学 生命科学学院，临汾 041000，山西；2. 山西师范大学 现代文理学院，临汾 041000，山西；3. 山西师范大学 地理科学学院，临汾 041000，山西）

摘　要：为了探讨藜麦应对施肥深度和水分胁迫的响应，该文以藜麦（*Chenopodium quinoa*）为材料，在盆栽条件下，设置 3 种施氮深度：D1（控释尿素施在 0~8 cm）、D2（控释尿素施在 8~16 cm）、D3（控释尿素施在 16~24 cm）和 3 种水分处理：W1（正常供水）、W2（中度干旱）、W3（重度干旱），分析施氮深度和水分胁迫对藜麦幼苗生理及产量的影响。结果表明：（1）相同水分条件下，随着施肥深度的增加，藜麦生长指标（株高、茎粗、叶面积、地上部生物量、主根长、根系表面积、根系体积）、生理指标[超氧化物歧化酶(SOD)活性、过氧化物酶(POD)活性、过氧化氢酶(CAT)活性、可溶性糖含量、可溶性蛋白含量、叶绿素总量]和产量指标呈先升高后降低趋势。D2 处理（适当的深施氮肥）均高于 D1（浅层施氮）和 D3 处理（底层施氮）。（2）相同施氮深度条件下，随着干旱胁迫程度的增加，藜麦生长指标和产量指标呈逐渐降低的趋势，生理指标均呈先升高后降低的趋势。说明藜麦幼苗对水分需求明显，可通过增加抗氧化酶活性和渗透调节物质适应一定程度的干旱，生产实践中应注意苗期水分的供应，以促进生育后期产量的形成。综上可知，适宜的水氮管理（D2W1）可以促进藜麦的生长及生理特性，增强藜麦的抗旱能力，提高藜麦的产量。本研究结果为进一步研究藜麦的水肥管理、高产栽培提供参考。

关键词：藜麦，水分胁迫，施肥深度，控释尿素，幼苗形态发育，幼苗生理特性，产量

中图分类号：Q945　　　　　　**文献标识码**：A

Effects of nitrogen fertilization depth and water stress on quinoa seedling physiological characteristics and yield

LI Yani[1], PANG Chunhua[1,2], ZHANG Yongqing[1,3], ZHANG Yuan[1]

（1. *College of Life Sciences*, *Shanxi Normal University*, Linfen 041000, Shanxi, China; 2. *College of Modern Arts and Sciences*, *Shanxi Normal University*, Linfen 041000, Shanxi, China; 3. *College of Geographical Sciences*, *Shanxi Normal University*, Linfen 041000, Shanxi, China）

Abstract: To explore the response mechanism of *Chenopodium quinoa* to fertilization depth and

基金项目：国家自然科学基金（31571604）；山西师范大学现代文理学院基础研究项目(2019JCY15)[Supported by the National Natural Science Foundation of China(31571604); Basic Research Project of College of Modern Arts and Science, Shanxi Normal University(2019JCY15)]。

作者简介：李亚妮（1994-），硕士研究生，主要从事植物生理生态研究，(Email) lynzg126@126.com。

*__通信作者__：庞春花，硕士，教授，主要从事植物生理生态方面的教学与研究，(Email) pangch6269@162.com。

water stress. Quinoa in pots were used as materials to set three fertilizer treatments [D1, placement of controlled-release urea (CRU) at 0-8 cm depth; D2, placement of CRU at 8-16 cm depth; D3, placement of CRU at 16-24 cm depth] and three kinds of water treatments (W1, normal moisture; W2, moderate drought; W3, severe drought) to discuss the effects of quinoa seedling physiological characteristics and yield. The results were as follows: (1) Under the same water condition, with the increase of fertilization depth, the growth indexes (plant height, stem diameter, leaf area, biomass above ground, length of main root, surface area of root, root volume), physiological indexes [superoxide(SOD) activity, peroxidase(POD) activity, catalase (CAT) activity, soluble sugar, soluble protein, and the total chlorophyll content and yield index tended to increase initially and then decrease D2 treatment (appropriate deep application of nitrogen) was higher than D1 (shallow nitrogen) and D3 treatment (bottom nitrogen application). (2) Under the same nitrogen application depth, with the increase of drought stress, the growth indexes and yield index of quinoa decreased gradually, and the physiological indexes were both rising first and then decreasing. It is suggested that the water demand of quinoa seedlings is obvious, which can adapt to drought to some extent by increasing antioxidant enzyme activities and osmotic regulating substances. In practice, attention should be paid to the supply of water in seedling stage to promote the formation of yield in the later stage of growth. In conclusion, suitable water and nitrogen management (D2W1) can promote the growth and physiological characteristics of quinoa, enhance the drought resistance of quinoa and improve the yield of quinoa. The results of this study provide a reference for further study on water and fertilizer management and high yield cultivation of quinoa.

Keywords: *Chenopodium quinoa*, water stress, fertilization depth, controlled-release urea, morphological development of seedling, physiological characteristics of seedling, yield

藜麦是藜科藜属一年生草本植物，原产于南美洲安第斯山脉，因其具有较高的营养价值和良好的生态适应性，成为国内外多个研究领域的热点（庞春花等，2017）。在干旱和半干旱地区，水分亏缺是影响作物产量的主要因素，选育和栽培耐旱作物是应对干旱的一项重要措施，藜麦作为一种节水抗旱作物，明确其抗旱机理，提高其抗旱能力，将在我国土壤利用开发中发挥重要作用（刘文瑜等，2019）。水肥与产量的关系是重要的研究课题，生产上通过一定的水肥措施达到“以肥促根”“以根调水”的目的（李秧秧等，2000），进而提高水肥利用率，实现作物增产。

控释尿素作为一种新型肥料，能够根据作物对养分的需求控制其养分释放模式，使养分释放与作物养分吸收基本同步，从而减少氮素损失，提高氮肥利用率（刘威等，2019）。有研究表明，普通尿素施入土壤后在短期内溶解，不能全部被植物吸收利用（武鹏等，2018），控释尿素合理的施用，对藜麦在旱地农业的发展具有重要意义。

研究表明，合理的施肥深度是提高肥效的关键所在（苏志峰等，2016），改变施肥深度，可以间接调节作物的根系分布，充分调动作物根系对土壤水分和养分的吸收利用（沈玉芳，李世清，2019）。与肥料表施或浅施相比，肥料深施可以提高肥料利用率，延长肥效，促进作物后期生长，进而提高作物产量（于晓芳等，2013；谷晓博等，2016）。据报道，肥料深施还可以有效的避免因肥料与种子太过接近而造成的毒害，避免烧苗（Zhang & Rengel ,2002），但肥料的深施范围尚不明确（杨云马等，2016）。张永清等（2006）研究认为，小麦施肥深度 10~30 cm 有利于根系对较深层次土壤养分的吸收。赵堂甫等（2020）研究认为，在 5~20 cm 深度内，玉米的产量随着施肥深度的增加而显著提高。可见，不同作物适宜生长的施肥深度存在较大差异，目前，藜麦的最适施氮深度尚不明确。国内外学者对

水肥耦合的研究比较多，把水分和施肥深度结合起来的研究则鲜有报道（康小华等，2017）。由于施肥深度显著影响作物水氮条件的供应，探明水分胁迫和施氮深度对藜麦幼苗生长、生理特性的影响，确定最佳水分条件和施氮深度，提高氮肥利用率，实现藜麦增产具有重要意义。本研究结合幼苗生长、生理活性和产量分析，探索了藜麦在干旱及半干旱地区施肥深度和水分供应最佳组合，旨在为干旱及半干旱地区藜麦科学合理的水肥管理提供理论基础和实践依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料与试验设计

供试藜麦品种为“亿隆 1 号”，购自山西忻州亿隆藜麦科技推广有限公司；供试控释尿素为“硫包衣尿素”（含 N 37%）。供试磷肥和钾肥分别是过磷酸钙（含 P_2O_5 15%）、氯化钾（含 K_2O 52%）。控释尿素、过磷酸钙和氯化钾用量分别为 0.2、0.2 和 0.15 g·kg^{-1}。所有肥料均用作基肥，一次性施入。试验所用盆的规格为 31 cm（直径）×31 cm（盆深），每盆装风干土 15 kg。为了模拟黄土高原旱薄区的土壤养分情况，供试土壤采用距地表 3 m 以下养分含量相对较低的生土，其基本理化性质为碱解氮含量 2.3 mg·kg^{-1}、速效磷含量 3.4 mg·kg^{-1}、速效钾含量 93.5 mg·kg^{-1}、有机质含量 1.7 g·kg^{-1}、土壤 pH7.9。装土前将土壤风干碾碎并过筛，分层装入。为了模拟田间自然条件下的水分情况，采用插管底部灌水法进行盆栽试验。

试验设计为双因素完全随机设计，因素 D 为施氮深度，综合前人研究（于晓芳等，2013；谷晓博等，2016；杨云马等，2016；刘威等，2019；赵堂甫等，2020）共设 3 个水平：D1（控释尿素施在 0~8 cm）、D2（控释尿素施在 8~16 cm）和 D3（控释尿素施在 16~24 cm）；因素 W 为供水量，综合前人研究（倪瑞军等，2015；庞春花等，2017）同样设 3 个水平：正常供水（W1，土壤相对含水量为 65%~75%）、中度干旱胁迫（W2，土壤相对含水量为 45%~55%）和重度干旱胁迫（W3，土壤相对含水量为 25%~35%），每晚 18:00 采用称重法控制土壤含水量在设定范围内。试验共 3×3=9 个处理组合，每个处理重复 3 次，共 27 盆。试验选取饱满、大小一致的藜麦种子，用 10% H_2O_2 对种子进行消毒 10 min，用蒸馏水反复冲洗多次，于 2019 年 5 月 11 日播种，每盆播 35 粒。待出苗后第 5 天（三叶期），每盆均留苗 7 株，每个处理 3 盆，花盆随机摆放。在出苗后第 15 天（幼苗期）取 3 次重复进行指标的测定，将地上部和地下部分开收获，将地下部冲洗干净保存在 4℃冰箱进行形态指标和各项生理指标的测定。于 2019 年 9 月 11 日（成熟期）收获，取 3 次重复进行产量指标的测定。

1.2 测定项目及方法

生长指标：采用烘干称重法测定地上部和地下部干重；采用直尺直接测量株高；采用精度 0.02 mm 的游标卡尺测量茎粗；用 L-3000A 叶面积仪测量叶面积；用根系扫描仪 Win-RHIZO 测量总根长、根系平均直径、根系表面积、根系体积。

生理指标：采用 NBT 法测超氧化物歧化酶（SOD）活性、愈创木酚法测过氧化物酶（POD）活性、氮蓝四唑法测定过氧化氢酶（CAT）活性、蒽酮比色法测定可溶性糖含量、考马斯亮蓝法测定可溶性蛋白含量、丙酮-乙醇直接浸提法测定叶绿素总量（张志良，2009）。

产量指标：顶穗粒数、顶穗小穗数、分枝数、穗数用直接计数法测定，产量和千粒重采用称重法测定。

1.3 数据处理

运用 Microsoft Excel 2007 软件对实验数据进行整理，用 SPSS 17.0 软件对数据进行统计分析，采用 Duncan's 法进行多重比较，SigamPlot 12.5 软件作图，数据结果用平均值±标准差表示。

2 结果与分析

2.1 施氮深度和水分胁迫对藜麦地上部生长的影响

表 1 结果表明，施肥深度、水分处理及二者的交互作用均对藜麦的株高、茎粗、地上部生物量有显著影响，施肥深度和水分处理还对藜麦的叶面积有显著影响。

藜麦幼苗株高、茎粗、叶面积、地上部生物量在各处理均随控释尿素的施用深度增加先升高后降低，均在 D2 处理最大。株高在 D2 处理分别比 D1 和 D3 处理显著提高了 4.74%、13.97%、3.00%和 7.02%、3.41%、7.15%；茎粗在 D2 处理分别比 D1 和 D3 处理显著提高了 36.10%、38.07%、16.12%和 23.84%、19.49%、20.76%；叶面积在 D2 处理分别比 D1 和 D3 处理显著提高了 5.38%、9.13%、11.21%和 11.86%、7.75%、8.66%；地上部生物量在 D2 处理分别比 D1 和 D3 处理显著提高了 10.71%、21.83%、6.37%和 10.29%、7.02%、16.96%。随着水分胁迫增强，各施肥深度处理藜麦株高、茎粗、叶面积、地上部生物量均表现为 W1>W2>W3，株高在 W2 和 W3 处理比 W1 显著减小 15.67%、31.50%、17.18%和 32.45%、10.51%、27.11%；茎粗和叶面积在部分处理差异显著；地上部生物量在 W2 和 W3 处理比 W1 显著减小 15.11%、29.33%、19.05%和 32.14%、7.11%、27.92%。

表 1 水分和控释尿素耦合对藜麦地上部生长的影响

Table 1 Effects of water and controlled-release urea coupling on the upper growth of quinoa

处理 Treatment	株高 Plant height (cm)	茎粗 Stem diameter (mm)	叶面积 Leaf area (cm^2)	地上部生物量 Aboveground biomass (g)
D1W1	28.85±0.24b	1.72±0.08bc	4.46±0.04b	2.25±0.02b
D1W2	24.33±0.20e	1.63±0.03c	4.09±0.09d	1.91±0.03e
D1W3	19.76±0.19h	1.27±0.04d	3.73±0.05e	1.59±0.02h
D2W1	30.29±0.09a	2.70±0.04a	4.71±0.05a	2.52±0.02a
D2W2	25.08±0.11d	1.94±0.03b	4.61±0.03ab	2.04±0.01c
D2W3	20.46±0.10g	1.57±0.05c	4.04±0.06d	1.71±0.03g
D3W1	26.06±0.16c	1.67±0.07c	4.28±0.02c	1.97±0.01d
D3W2	23.32±0.23f	1.48±0.05cd	4.06±0.08d	1.83±0.01f
D3W3	19.00±0.28i	1.25±0.02d	3.69±0.06e	1.42±0.01i
D	1 562.62**	52.45**	50.80**	290.60**
W	130.47**	53.64**	103.08**	1 066.52**
D×W	17.04**	7.72*	1.82	23.65**

注：数据=平均值+标准差。**D1**. 控释尿素施在 0~8 cm；**D2**. 控释尿素施在 8~16 cm；**D3**. 控释尿素施在 16~24 cm；**W1**. 正常供水；**W2**. 中度干旱；**W3**. 重度干旱。各因素数据(D、W)为方差分析 *F* 值。同列不同字母表示差异显著(P<0.05)。 *表示 P<0.05；**表示 P <0.01。下同。

Note: Data=mean+SD. **D1**. Placement of CRU at 0-8 cm depth; **D2**. Placement of CRU at 8-16 cm depth; **D3**. Placement of CRU at 16-24 cm depth; **W1**. Normal moisture; **W2**. Moderate drought; **W3**. Severe drought. The data of each facter (D, W) are anova *F* value. Different letters in the same column meant significant differences among treatments(P<0.05). * means P<0.05; ** means P<0.01. The same below.

2.2 施氮深度和水分胁迫对藜麦根系生长的影响

植株的主根长、根系平均直径、根系表面积和根系体积是分析根系生长发育情况、研究作物抗旱性的重要指标，可反映根系生长与环境的适应性。表 2 结果表明，施肥深度、水分处理及两者的交互作用对藜麦的根系表面积有显著影响，施肥深度和水分处理对藜麦的主根长、根系平均直径和根系体积也有显著影响。

藜麦幼苗主根长、根系体积、根系表面积和根系平均直径在各处理均随氮肥施用深度的增加先升高后降低，均在 D2 处理最大。主根长在 D2 处理分别比 D1 和 D3 处理显著提高了 5.96%、13.80%、10.48%和 16.58%、10.11%、15.45%；根系体积在 D2 处理分别比 D1 和 D3 处理显著提高了 13.22%、21.85%、13.24%和 20.95%、22.64%、36.47%；根系表面积在 D2 处理分别比 D3 处理显著提高了 22.62%、10.06%、17.33%，D1 和 D2 处理差异不显著；根系体积在各施肥深度处理部分差异显著。藜麦主根长、根系体积、根系表面积和根系平均直径均随水分胁迫逐渐减小，主根长在 W2 和 W3 处理比 W1 显著减小 23.54%、48.89%、19.69%和 46.54%、22.28%、47.56%；根系体积在 W2 和 W3 处理比 W1 显著减小 31.47%、73.30%、31.45%和 70.04%、30.67%、75.65%；根系表面积在 W2 和 W3 比正常供水显著减小 46.03%、70.22%、42.81%和 71.70%、43.96%、70.37%；根系平均直径在部分处理差异显著。

表 2 水分和控释尿素耦合对藜麦根系生长的影响

Table 2 Effects of water and controlled-release urea coupling on root system of quinoa

处理 Treatment	主根长 Length of the longest root (cm)	根系平均直径 Root average diameter (mm)	根系表面积 Total root area (cm^2)	根系体积 Root volume (cm^3)
D1W1	16.24±0.18b	0.45±0.01abc	24.92±0.45b	3.28±0.07b
D1W2	12.42±0.25e	0.42±0.01cd	13.45±0.42e	2.25±0.14e
D1W3	8.30±0.17h	0.34±0.02fg	7.42±0.17fg	0.88±0.10g
D2W1	17.27±0.24a	0.48±0.02a	29.15±0.60a	3.78±0.06a
D2W2	13.87±0.14d	0.48±0.01ab	16.67±0.38d	2.59±0.08d
D2W3	9.23±0.24g	0.38±0.02de	8.25±0.05f	1.13±0.07f
D3W1	14.89±0.23c	0.43±0.01bc	23.02±0.26c	2.96±0.04c
D3W2	11.57±0.34f	0.37±0.02ef	12.90±0.51e	2.05±0.07e
D3W3	7.81±0.14h	0.32±0.02g	6.82±0.42g	0.72±0.09g
D	899.22**	18.55**	1616.13**	645.34**
W	63.29**	43.76**	73.12**	39.02**
D×W	1.84	0.81	9.77**	1.63

2.3 施氮深度和水分胁迫对藜麦生理指标的影响

表 3 结果表明，施肥深度、水分处理均对藜麦的 SOD、POD、CAT 活性和可溶性糖、可溶性蛋白含量及叶绿素总量有显著影响，施肥深度和水分处理的交互作用还对藜麦的 POD、CAT 活性有显著影响。

表 3 水分和控释尿素耦合对藜麦生理特性的影响

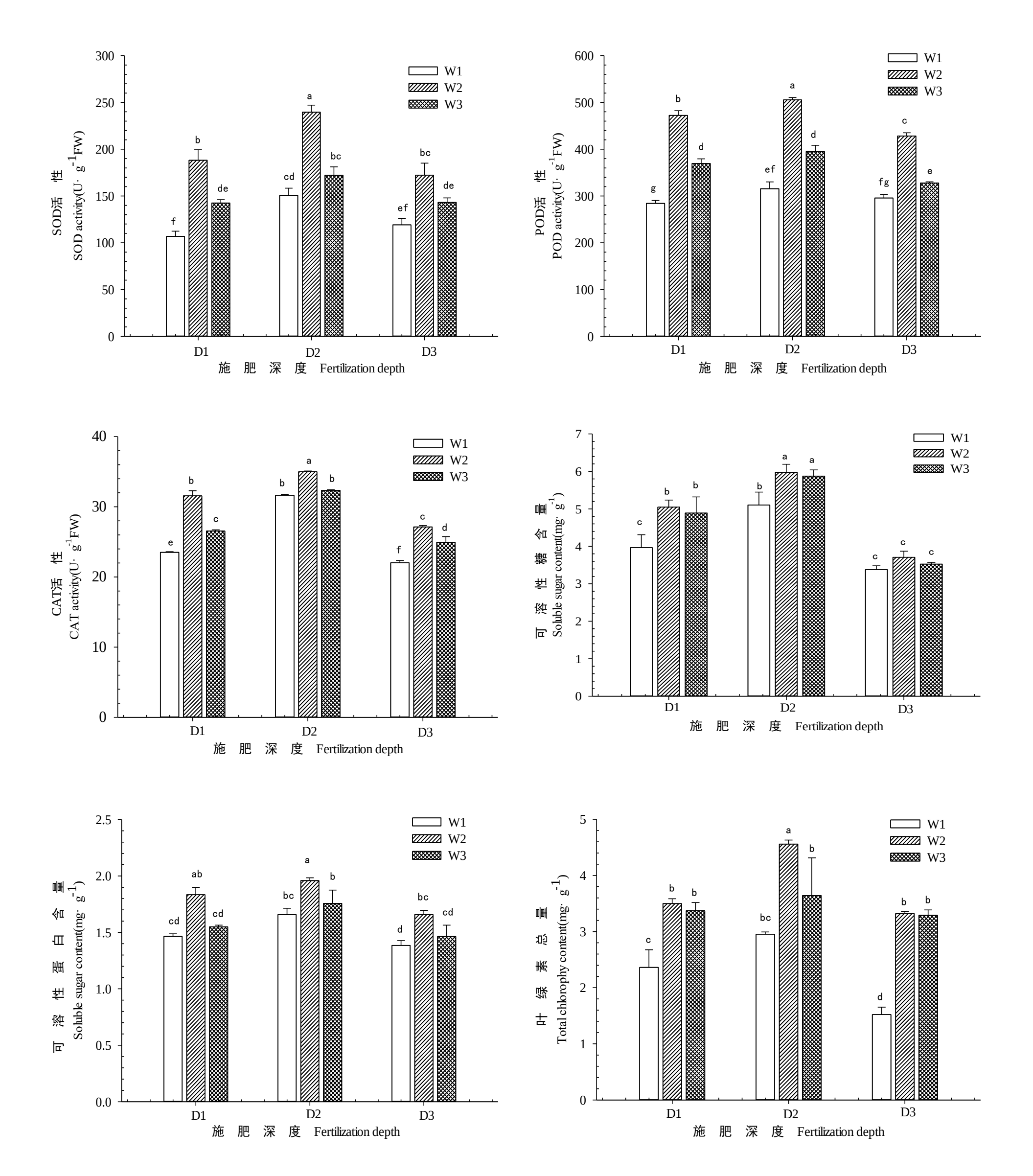
Table 3 Effects of water and controlled-release urea coupling on physiological characteristics of quinoa

指标 Index	D	W	D×W
SOD 活性 SOD activity	26.32**	63.50**	1.94

POD 活性 POD activity	29.52**	289.63**	4.23*
CAT 活性 CAT activity	341.06**	144.26**	10.15**
可溶性糖含量 Soluble sugar content	52.88**	7.71*	0.84
可溶性蛋白含量 Soluble protein content	16.02**	19.88**	0.21
叶绿素总量 Total chlorophyll content	11.46*	27.49**	1.61

从图 1 可以看出，藜麦幼苗根系 SOD、POD 和 CAT 活性均随控释尿素的施用深度增加先升高后降低，均在 D2 处理最大。SOD 活性在 D2 处理（W1、W2 和 W3 处理分别为 150.56、239.51、172.14U g^{-1}FW）分别比 D1 和 D3 处理显著提高了 29.10%、20.87%、21.43%和 28.05%、17.18%、16.84%；POD 活性仅在 W1 和 W2 处理差异显著；CAT 活性在 D2 处理（W1、W2 和 W3 处理分别为 31.65、34.99、32.35 U g^{-1}FW）分别比 D1 和 D3 处理显著提高了 25.71%、30.44%、9.80%和 22.47%、17.96%、22.89%。藜麦幼苗的 3 种酶活性均随干旱胁迫增强先升高后降低，SOD 活性在中度干旱处理（D1、D2 和 D3 处理幼苗分别为 188.19、239.51、172.33 U g^{-1}FW）分别比对照显著提高了 43.28%、37.14%和 30.87%；POD 活性在中度干旱处理（D1、D2 和 D3 处理幼苗分别为 472.45、505.44、428.33 U g^{-1}FW）分别比对照显著提高了 39.83%、37.56%和 30.96%；CAT 活性在中度干旱处理（D1、D2 和 D3 处理幼苗分别为 31.56、34.99、27.13 U g^{-1}FW）分别比对照显著提高了 25.52%、9.56%和 18.85%，不同干旱处理间差异显著。

藜麦幼苗可溶性糖、可溶性蛋白含量和叶绿素总量均随氮肥的施用深度增加先升高后降低，均在 D2 处理最大。可溶性蛋白含量和叶绿素总量仅在部分水分处理差异显著；可溶性糖含量在 D2 处理（W1、W2 和 W3 处理分别为 5.10、5.97、5.87 mg g^{-1}）分别比 D1 和 D3 处理显著提高了 22.27%、33.78%、15.52%和 37.91%、16.78%、39.96%。藜麦可溶性糖、可溶性蛋白含量和叶绿素总量均随水分胁迫增强先增大后减小，可溶性糖含量在 W2 胁迫处理最大，D1 和 D2 处理差异显著，D3 处理差异不显著；可溶性蛋白含量在 W2 处理最大（D1、D2 和 D3 处理分别为 1.83、1.96、1.66 mg g^{-1}）分别比对照显著提高 20.17%、15.38%和 16.43%；叶绿素总量在 W2 处理最大（D1、D2 和 D3 处理分别为 3.50、4.56、3.32 mg g^{-1}）分别比对照显著提高了 32.46%、35.19%和 54.18%，不同干旱处理间藜麦 MDA 含量差异显著，可溶性糖、可溶性蛋白含量和叶绿素总量差异不显著。



D1. 控释尿素施在 0~8 cm；**D2**. 控释尿素施在 8~16 cm；**D3**. 控释尿素施在 16~24 cm；**W1**. 正常供水；**W2**. 中度干旱；**W3**. 重度干旱。不同字母表示不同处理之间差异显著(P<0.05)。

D1. Placement of CRU at 0-8 cm depth; **D2**. Placement of CRU at 8-16 cm depth; **D3**. Placement of CRU at 16-24 cm depth; **W1**. Normal moisture; **W2**. Moderate drought; **W3**. Severe drought. Different letters meant significant differences among treatments (P<0.05).

图 1 水分和控释尿素耦合对藜麦生理特性性的影响

Fig.1 Effects of water and controlled-release urea coupling on physiological characteristics of quinoa

2.4 施氮深度和水分胁迫对藜麦产量的影响

表 4 结果表明，施肥深度、水分处理及二者的交互作用均对藜麦的顶穗小穗数、产量和千粒重均有显著影响，控释尿素和水分处理还对藜麦的分枝数和穗数有显著影响，施氮深度和水分交互对藜麦的顶穗粒数有显著影响。藜麦顶穗粒数、顶穗小穗数、分枝数、穗数、产量和千粒重在各处理均随氮肥深度增加先升高后降低，均在 D2 处理最大。顶穗粒数在 D2 处理条件下分别比 D1 和 D3 处理显著提高了 14.56%、10.89%、36.93%和 9.78%、17.02%、11.00%；顶穗小穗数、分枝数、穗数、产量和千粒重在部分处理差异显著。随着干旱胁迫

增强，藜麦顶穗粒数、顶穗小穗数、分枝数、穗数、产量和千粒重在各施肥深度处理均随干旱胁迫逐渐降低，顶穗粒数在 W2 和 W3 处理比对照显著减小 39.70%、53.00%、18.45%和 51.60%、17.43%、51.67%；顶穗小穗数在 W2 和 W3 处理比 W1 处理显著减小 41.00%、57.00%、13.27%和 50.44%、8.08%、53.54%；分枝数和穗数在部分处理差异显著；产量在 W2 和 W3 处理比 W1 处理显著减小 26.79%、64.24%、13.74%和 55.56%、11.07%、56.79%；千粒重在部分处理差异显著。

表 4 水分和控释尿素耦合对藜麦产量及其构成因素的影响

Table 4 Effects of water and controlled-release urea coupling on yield and its components of quinoa

处理 Treatment	顶穗粒数 Grain number of apical	顶穗小穗数 Spikelet numbers of apical apike	分枝数 Branch number	穗数 Spike number	产量 Yield (g·pot^{-1})	千粒重 1 000-grain weight (g)
D1W1	968.00±13.32c	33.33±0.88b	27.33±0.88ab	23.33±0.88ab	48.57±0.49bc	2.64±0.03bc
D1W2	583.67±8.99f	19.67±0.88d	24.00±1.00cd	19.33±0.67cd	35.56±1.28e	2.32±0.03e
D1W3	455.00±13.65h	14.33±0.67e	20.00±1.00e	17.00±1.00e	17.37±1.65g	2.03±0.05f
D2W1	1133.00±13.58a	37.67±0.88a	28.33±0.67a	25.33±0.33a	53.55±0.94a	2.79±0.05a
D2W2	924.00±16.80d	32.67±1.45bc	27.00±0.00ab	22.67±0.33b	46.20±0.59cd	2.73±0.04ab
D2W3	548.33±11.22g	18.67±0.67d	23.00±0.58d	19.00±0.58de	23.80±1.31f	2.48±0.06d
D3W1	1009.67±10.27b	33.00±1.00b	27.33±0.88ab	23.00±1.00b	49.62±0.43b	2.74±0.01ab
D3W2	833.67±5.04e	30.33±0.33c	25.67±0.67bc	21.33±0.88bc	44.13±0.89d	2.63±0.06bc
D3W3	488.00±4.04h	15.33±0.33e	22.33±0.88de	18.33±0.33de	21.44±0.54f	2.52±0.03cd
D	227.55**	53.75**	6.66**	8.74**	42.29**	56.08**
W	1662.00	360.97**	43.26**	48.31**	717.88**	58.50**
D×W	40.84**	14.29**	0.78	0.88	4.09*	6.18**

3 讨论

3.1 施肥深度和水分胁迫对藜麦形态性状的影响

在黄土高原上引种藜麦经常会面临干旱缺水的问题（倪瑞军等，2015）。水分条件和施氮深度的合理利用能提高水肥利用率，促进作物的生长（刘新永等，2007；邵芳丽等，2012；赵堂甫等，2020）。崔红红和李援农（2014）研究证明，在一定的施氮条件下，灌水量的增加能显著促进小麦各项形态指标的增加，灌水定额以 80 mm 为宜。段娜等（2019）的研究结果表明，60%~80%水分供应为欧李生长的最适生态位。本研究结果表明，在施氮深度相同条件下，藜麦株高、茎粗、叶面积、地上部生物量均随着土壤含水量的增加而增加，但增加的幅度不同，均在供水量为 65%~75%时达到最大值，与上述研究结果相似。说明水分胁迫显著抑制肥效的发挥，充足的水分对藜麦幼苗具有明显的促进作用。藜麦叶面积和株高形态变化显著，说明苗期株高和叶面积对水分条件相对敏感，茎粗的增加幅度较小可能是因为幼苗期植株的生长期较短，影响物质分配。干旱条件下，氮肥施用过深和过浅均使藜麦的株高、茎粗、叶面积和地上部生物量不同程度的降低，这可能是因为氮素供应不足直接导致藜

麦生长受到抑制，表现为植株矮小，生长缓慢，而适宜深施氮肥可以促进植株对养分的吸收，降低对藜麦幼苗地上部生长的抑制效应，从而缓解水分不足造成的不利影响。

根系作为吸收水分和养分的器官，受水分胁迫的影响最为明显，且在不同土层影响不同（张玉等，2014；丁红等，2015），通过改变施肥深度可以调节作物根系在不同土层深度中的分布，适当加深施肥深度有利于保持作物根系活力，促进根系的生长和水分利用率的提高（张永清等，2006；孙权等，2007）。本研究中，干旱胁迫显著抑制藜麦主根长、根系平均直径、根系表面积和根系体积，且干旱胁迫程度越大，对藜麦根系发育的抑制作用越强，不同的施氮深度，藜麦根系对水分胁迫的敏感程度不同，与 D1 和 D3 处理相比，D2 处理施用效果最好，说明适宜深施控释尿素处理改善了藜麦深层根系生长状况，为根系深层扩展提供良好条件，表现为根系发达，减缓深层根系衰老（Li et al., 2009；Guo et al., 2016），提高了藜麦根系的耐旱性。本研究中，施肥深度对正常供水条件下藜麦根系平均直径、根系表面积和根系体积无显著差异，说明施氮深度对正常供水条件下藜麦根系发育的影响效应低于干旱胁迫处理，说明水分条件对幼苗的影响大于施肥深度对幼苗的影响，施氮深度对水分有一定的补偿效应，这与 Hu et al.（2013）和 Fageria et al.（2014）的研究结果相似。

3.2 施肥深度和水分胁迫对藜麦生理指标的影响

研究表明，抗氧化酶活性越高，作物对逆境的抗性越强。可溶性糖和可溶性蛋白作为渗透调节物质，能够保持原生质和环境的渗透平衡，维持植物的正常代谢，其含量的多少可以反映植物的抗逆性（李鑫等，2015）。不同施肥深度，对作物根系生理活性影响显著，深层施肥小麦根系 SOD、CAT 活性保持较高水平，可溶性蛋白含量降低，有效缓解根系衰老（石岩，2011）。本研究结果表明，干旱胁迫条件下，D2 处理藜麦 SOD、POD 和 CAT 活性增强，可溶性糖和可溶性蛋白的含量升高，说明不同的抗氧化酶和渗透调节物质均有相同的调节机制抵抗干旱，这与乌日娜等（2020）的研究结果相似。藜麦在中度干旱条件下能够保持较高的抗氧化酶活性和渗透调节物质含量，且 D2 处理最高，说明 D1 和 D3 处理均不利于藜麦抵御逆境胁迫，适宜深施氮肥能够改善藜麦内在生理活性，增强藜麦抗旱性，促进对水分的吸收和维持水分平衡的能力，保护细胞免受干旱胁迫的危害，提高藜麦对水分胁迫的耐受性，控释尿素施用过浅和过深，藜麦抗氧化酶活性和渗透调节物质均降低，加速根系衰老。重度干旱条件下，藜麦抗氧化酶活性降低，自由基代谢失衡，说明藜麦在响应不同的水分胁迫时表现出一定的差异性，幼苗能忍受中度干旱胁迫，在重度干旱胁迫时幼苗受迫害严重，可能是因为重度干旱对藜麦细胞已造成了损伤，清除活性氧的能力降低，这与岳凯等（2019）的研究结果一致。叶绿素含量对光合作用有重要影响（张仁和，2012），本研究中，藜麦在 D2W2 条件下叶绿素含量保持较高水平，说明中度干旱胁迫和适宜施氮深度促进叶绿素的合成，提高应对干旱胁迫的能力，维持正常的光合作用，与藜麦幼苗抗氧化酶活性和渗透调节物质含量表现出了一致性。

3.3 施肥深度和水分胁迫对藜麦产量的影响

有研究表明，适度的水氮供应能够提升作物的产量，改善作物品质（胡钧铭等，2018），深施肥有利于提高玉米的产量（李振等，2014），但深施肥不利于木薯产量的增加（郑玉等，2011）。玉米苗期和成熟期干物质量以施肥深度在种下 6 和 12 cm 最高，10 cm 深度施肥氮肥利用率较高，施在 24 cm 会显著降低氮肥利用率，影响玉米产量和氮吸收量（李振等，2014；杨云马等，2016）。鲁飘飘等（2014）研究表明氮肥深施有利于油菜地上部与根系和籽粒的协调，且施用深度为 16 cm 时油菜产量最高。本研究结果表明，相同水分条件下，D2 处理藜麦顶穗粒数、顶穗小穗数、分枝数、穗数和千粒重指标数均最高，促进藜麦产量的形成，表现为产量最高，D3 处理产量次之，D1 处理产量最低，综合藜麦产量和产量构成情况，初步得出适宜藜麦生长的施肥深度为 8~16 cm，表明深施控释尿素显著提高了藜麦的产量，D1 和 D3 处理对藜麦产量呈负效应，这可能是因为肥料浅施处理促进了藜麦生育前期的生长，

随着植株的生长，根系的趋肥性导致根系范围小，生育后期水分和养分吸收不足，抑制了藜麦产量的形成；肥料施用过深使藜麦发育前期养分供应不足，生理活性最低，但促进藜麦生育后期根系下扎，水分和养分充足，生长恢复，弥补了生育前期养分不足造成的影响，藜麦的产量次高，而肥料适宜深施满足了藜麦各生育期对水分和养分的需求，产量最高。以上研究表明，在一定水分条件下，适当调节施氮深度可以促进作物产量的形成。Kaushal et al.（2006）认为在 20 cm 处施缓释肥可提高大豆产量，与本研究结果不一致，这可能与研究材料和肥料种类及环境因素等差异所致。本研究中，在干旱胁迫下藜麦产量构成存在显著差异，干旱胁迫降低了藜麦顶穗粒数、顶穗小穗数、分枝数、穗数和千粒重，从而抑制藜麦产量的形成，藜麦形成产量的最佳水分条件为 W1，虽然藜麦自身具有一定的抗旱性，但是不同的水肥条件下，藜麦的抗旱能力不尽相同，导致藜麦的产量不同，说明在施肥深度一定时，可以适当增加土壤含水量来提高藜麦的产量（Guo et al., 2007；崔红艳，2016）。

4 结论

本试验条件下，调整水分和施氮深度能够诱导根系寻找深层土壤水分和养分，进而调节藜麦的根系分布、促进藜麦生长、增强藜麦生理特性、显著提高藜麦的产量，且藜麦种植最佳方案为 D2W1，可以作为提高藜麦产量的一种参考途径。然而，水分和施肥深度对藜麦生长发育的影响还受作物内在因素、外界生长环境（崔婉莹等，2019）和肥料施用类型等诸多因素的影响，因此，其他生态条件下，藜麦种植的最优栽培方案可在本研究基础上作进一步的研究与探讨。

参考文献:

CUI HH, LI YN, 2014. Study on infiltration-reducing effect of cement infiltrating into the riverbed alluvial silt[J]. J Irr Drain, 33(3):101-114. [崔红红，李援农，2014. 起垄覆膜沟播与水氮耦合对拔节抽穗期冬小麦生长的影响[J]. 灌溉排水学报，33(3):101-114.]

CUI HY, FANG ZS, 2016. Effect of nitrogen and irrigation interaction on matter production and grain yield oil flax under different irrigation modes[J]. Acta Bot Boreal-Occident Sin, 36(1):156-164. [崔红艳，方子森，2016.水氮互作对胡麻干物质生产和产量的影响[J]. 西北植物学报，36(1):156-164.]

CUI WY, LIU SJ, WEI YW, et al., 2019. Effects of nitrogen addition on biomass allocation of *Pinus koraiensis and Fraxinus mandshu-rica* seedlings under water stress[J]. Chin J Appl Ecol, 30(5):1454-1462. [崔婉莹，刘思佳，魏亚伟，等，2019. 氮添加和水分胁迫对红松、水曲柳幼苗生物量分配的影响[J]. 应用生态学报，30(5):1454-1462.]

DING H, ZHANG ZM, DAI LX, et al., 2015. Effects of water stress and nitrogen fertilization on peanut root morphological development and leaf physiological activities[J]. Chin J Appl Ecol, 26(2):450-456. [丁红，张志猛，戴良香，等，2015. 水分胁迫和氮肥对花生根系形态发育及叶片生理活性的影响[J]. 应用生态学报，26(2):450-456.]

DUAN N, XU J, CHEN HL, et al., 2019. Effects of drought stress on phenotypic plasticity of *Cerasus humilis*[J]. Guihaia, 39(9):1159-1165. [段娜，徐军，陈海玲，等，2019. 干旱胁迫对欧李幼苗表型可塑性的影响[J]. 广西植物，39(9):1159-1165.]

FAGERIA NK, CARVALHO MC, 2014. Comparison of conventional and polymer coated urea as nitrogen sources for lowland rice production[J]. Plant Nutr, 37(8):1358-1371.

GU XB, LI YN, DU YD, et al., 2016. Effects of fertilization depth on yield, root distribution and nutrient uptake of winter oilseed rape(*Brassica napus* L.)[J]. Trans Chin Soc Agric Mach, 47(6):120-128. [谷晓博，李援农，杜娅丹，等，2016. 施肥深度对冬油菜产量、根系分布和养分吸收的影响[J]. 农业机械学报，47(6):120-128.]

GUO LW, NING T Y, NIE LP, et al., 2016. Interaction of deep placed controlled-release urea and water retention agent on nitrogen and water use and maize yield[J]. European J Agron, 75(1):118-129.

HU HY, NING TY, LI ZJ, et al., 2013. Coupling effects of urea types and sub soiling on nitrogen-water use and yield of different varieties of maize in northern China[J].Field Crop Res, 142(12):85-94.

HU JM, HUANG ZH, LUO WG, et al., 2018. Effects of micro-sprinkler irrigation on soil water and nitrogen and yield under banana-mung bean intercropping[J]. Guihaia, 38(6):710-718. [胡钧铭，黄忠华，罗维钢，等，2018. 蕉肥间作下微喷灌对蕉园土壤水氮动态及香蕉产量的影响[J]. 广西植物，38(6):710-718.]

KANG XH, SHEN BY, WANG HL, et al., 2017. Effects of nitrogen fertilizer application rate and ratio base to topdressing on yield and economic characters of quinoa[J]. J Agric, 7(12):34-37. [康小华，沈宝玉，王海龙，等，2017. 不同氮肥施用量及基追比对藜麦产量及经济性状的影响[J]. 农学学报，7(12):34-37.]

KAUSHAL T, ONDA M, ITO S, et al., 2006. Effect of deep placement of slow-release fertilizer(Lime Nitrogren) applied at different rates on growth, N_2 fixation and yield of soya bean(*Glycine max* L.)[J]. J Agron Crop Sci, 192(6):417-426.

LI S, WANG Z, HU T, et al., 2009. Chapter 3 Nitrogen in dryland soils of China and its management[J]. Adv Agron, 101(8):123-181.

LI X, ZHANG YQ, WANG DY, et al., 2015. Effects of coupling water and nitrogen on root physio-ecological indices and yield of adzuki bean[J]. Chin J Eco-Agric, 23(12):1511-1519. [李鑫，张永清，王大勇，等，2015. 水氮耦合对红小豆根系生理生态及产量的影响[J]. 中国生态农业学报，23(12):1511-1519.]

LI YY, SHAO MA, 2000. Physio-ecological response of spring wheat root to water and nitrogen[J]. Plant Nutr Fert Sci, 6(4):383-388. [李秧秧，邵明安，2000. 小麦根系对水分和氮肥的生理生态反应[J]. 植物营养与肥料学报，6(4):383-388.]

LI Z, SONG QL, YAN C, et al., 2014. Effect of fertilization depth on N, P, K absorption and yield in corn[J]. J Maize Sci, 22(4):132-136. [李振，宋秋来，闫超，等，2014. 种肥深度对东北北部春玉米氮磷钾吸收及产量的影响[J]. 玉米科学，22(4):132-136.]

LIU W, ZHOU JX, XIE YY, et al., 2019. Ammonia volatilization and nitrogen use efficiency in the field of fresh edible maize as affected by different band fertilization depths of controlled-release urea[J]. Chin J Appl, 30(4):1295-1302. [刘威，周剑雄，谢媛圆，等，2019. 控释尿素条施深度对鲜食玉米田间氨挥发和氮肥利用率的影响[J].应用生态学报，30(4):1295-1302.]

LIU WY, HE B, YANG FY, et al., 2019. Physiological response to drought and re-watering of different quinoa varieties[J]. Pratacul Sci, 36(10):2656-2666. [刘文瑜，何斌，杨发荣，等，2019.不同品种藜麦幼苗对干旱胁迫和复水的生理响应[J]. 草业科学，36(10):2656-2666.]

LIU XY, TIAN CY, 2007. Coupling effect of water and nitrogen of cotton under plastic mulching by drip irrigation[J]. Plant Nutr Fert Sci, 13(2):286-291. [刘新永，田长彦，2007. 棉花膜下滴灌水氮耦合效应研究[J]. 植物营养与肥料学报，13(2):286-291.]

LU PP, WU J, HU XR, et al., 2014. Effects of nitrogen application depth on yield and nutrient utilization of rape seed[J]. Chin Agric Sci Bull, 30(30):34-37. [鲁飘飘，武际，胡现荣，等，2014. 氮肥基施深度对油菜产量和养分吸收利用的影响[J]. 中国农学通报，30(30):34-37.]

NI RJ, ZHANAG YQ, PANG CH, et al., 2015. Plastic response of quinoa seedling to change of water and nitrogen coupling[J]. Crops, (6):91-98. [倪瑞军，张永清，庞春花，等，2015. 藜麦幼苗对水氮耦合变化的可塑性响应[J]. 作物杂志，(6):91-98.]

PANG CH, ZHANG ZW, ZHANG YQ, 2017. Effect of water and phosphorus coupling on root growth, biomass allocation and yield of quinoa[J]. Sci Agric Sin, 50(21): 4107-4117. [庞春花，张紫薇，张永清，2017. 水磷耦合对藜麦根系生长、生物量积累及产量的影响[J]. 中国农业科学，50(21):4107-4117.]

SHAO LF, GONG YB, GUAN L, et al., 2012. Effects of different moisture gradients and N-fertilizer levels on *Cupressus Chengiana* seedling growth[J]. Bull Soil Water Conserv, 3(21):45-53. [邵丽芳，宫渊波，关灵，等，2012. 不同水氮条件对岷江柏幼苗生长的影响[J]. 水土保持通报，3(21):45-53.]

SHENG YF, LI SQ, 2019. Effect of fertilization depth on root characteristics and hydraulic lift of winter wheat under different water treatments[J]. J NW A & F Univ(Nat Sci Ed), 47(4):65-73. [沈玉芳，李世清，2019. 施肥深度对不同水分条件下冬小麦根系特征及提水作用的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版)，47(4):65-73.]

SHI Y, WEI DB, YU ZW, et al., 2011. Influence of fertilization depth on root system senescence of upland wheat after anthesis[J]. Chin J Appl Ecol, 12(4):573-575. [石岩，位东斌，于振文，等，2011. 施肥深度对旱地小麦花后根系衰老的影响[J]. 应用生态学报，12(4):573-575.]

SU ZF, YANG WP, DU TQ, et al., 2016. Effect of fertilization depth on maize root and rhizosphere soil fertility vertical distribution in immature loess subsoil[J]. Chin J Eco-Agric, 24(2):142-153. [苏志峰，杨文平，杜天庆，等，2016. 施肥深度对生土地玉米根系及根际土壤肥力垂直分布的影响[J]. 中国生态农业学报，24(2):142-153.]

SUN Q, WANG YF, WANG SF, et al., 2007. Influence of fertilization depth on NPK content in leaves, yield and fruit quality of grape vine[J]. J Fruit Sci, 24(4):445-459. [孙权，王静芳，王素芳，等，2007. 不同施肥深度对酿酒葡萄叶片养分和产量及品质的影响[J]. 果树学报，24(4):445-459.]

WU P, WANG YF, YANG KJ, et al., 2018. Effect of different nitrogen form and ratios on yield of maize and soil nutrient and enzymatic activity[J]. Soil Fert Sci Chin, (5):24-32. [武鹏，王玉凤，杨克军，等，2018. 不同氮素形态及配比对土壤养分和酶活性及玉米产量的影响[J]. 中国土壤与肥料，(5):24-32.]

WU RN, SHI FY, XU B, 2020. Zhilixing response and adaptation strategy to drought stress and rehydration[J]. Chin J Eco-Agric, 28(12):1901-1912. [乌日娜，石凤翎，徐舶，2020. 直立型扁蓿豆对干旱胁迫和复水的响应及适应策略[J]. 中国生态农业学报，28(12):1901-1912.]

YANG YM, SUN YM, JIA LL, et al., 2016. Effect of base nitrogen application depth on summer maize yield, nitrogen utilization efficiency and nitrogen residue[J]. J Plant Nutr Fert, 22(3):830-837. [杨云马，孙彦铭，贾良良，等，2016. 氮肥基施深度对夏玉米产量、氮素利用及氮残留的影响[J]. 植物营养与肥料学报，22(3):830-837.]

YU XF, GAO JL, YE J, et al., 2013. Effects of deep loosening with nitrogen deep placement on root growth, grain yield and nitrogen use efficiency of super high-yield spring maize[J]. J Maize Sci, 21(1):114-119. [于晓芳，高聚林，叶君，等，2013. 深松及氮肥深施对超高产春玉米根系生长、产量及氮肥利用效率的影响[J]. 玉米科学，21(1):114-119.]

YUE K, WEI XH, LIU WY, et al., 2019. Evaluation of drought tolerance of various quinoa species under PEG stress[J]. Agric Res Arid Areas, 37(3):52-59. [岳凯，魏小红，刘文瑜，等，2019.

PEG 胁迫下不同品系藜麦抗旱性评价[J]. 干旱地区农业研究，37(3):52-59.]

ZHANG RH, GUO DW, ZHANG XH, et al., 2012. Effects of nitrogen on photosynthesis and antioxidant enzyme activities of maize leaf under drought stress[J]. J Maize Sci, 20(6):118-122. [张仁和，郭东伟，张兴华，等，2012. 干旱胁迫下氮肥对玉米叶片生理特性的影响[J]. 玉米科学，20(6):118-122.]

ZHANG XK, RENGEL Z, 2002. Temporal dynamics of gradients of phosphorus, ammounium, pH, and electrical conductivity between a diammonium phosphate band and wheat roots[J]. Crop Pasture Sci, 53(53):985-992.

ZHANG Y, QIN HD, HUANG M, et al., 2014. Effect of different nitrogen application modes on root growth, rhizosphere soil characteristics and rice yield under no-tillage[J]. Guihaia, 34(5):681-685. [张玉，秦华东，黄敏，等，2014. 氮肥运筹对免耕水稻根系生长、根际土壤特性及产量的影响[J]. 广西植物，34(5):681-685.]

ZHANG YQ, LI H, MIAO GY, 2006. Effect of fertilization depth on distribution and late senescence of root system of spring wheat[J]. Soils, 38(1):110-112. [张永清，李华，苗果园，2006. 施肥深度对春小麦根系分布及后期衰老的影响[J]. 土壤，38(1):110-112.]

ZHANG YQ, MIAO GY, 2006. Biological response of winter wheat root system to ferilization depth[J]. Chin J Eco-Agric, 14(4):72-75. [张永清，苗果园，2006. 冬小麦根系对施肥深度的生物学响应研究[J]. 中国生态农业学报，14(4):72-75.]

ZHAO TF, XIAO HJ, ZHAO H, et al., 2020. Response of maize yield, biological traits and nutrient utilization and soil fertility to fertilization depth in Guizhou[J]. J Irr Drain, 39(Supper1):1672-3317. [赵堂甫，肖厚君，赵欢，等，2020. 基肥深施对贵州高产玉米产量和养分吸收利用的影响[J]. 灌溉排水学报，39(Supper1):1672-3317.]

ZHENG Y, HUANG J, FAN WF, et al., 2011. Effect of different fertilization depths on yield characters of cassava[J]. Acta Agric Jiangxi, 23(11):135-136. [郑玉，黄洁，范伟峰，等，2011. 施肥深度对木薯产量性状的影响[J].江西农业学报,23(11):135-136.]

ZHANG ZL, QU WJ, LI XF, 2009. Plant physiology experiment guidance[M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press: 32-227. [张志良，瞿伟菁，李小芳，2009. 植物生理学实验指导[M]. 4 版. 北京：高等教育出版社：32-227.]